

参考資料 1 - 8 「温熱指標の整理結果」

温熱指標について、文献を基に概要を整理すると共に、温熱4要素の考慮、屋外日射下での利用可能性の視点から指標を抽出した。各温熱指標の特徴については下表に整理し抽出された6指標(WBGT、SET*、ETU、PET、ETFe、UTCI)については、表中に網掛けを行った。

表 1 温熱指標の整理

指標名	概要	温熱4要素 屋外利用	
湿球黒球温度 WBGT	米軍兵士の熱中症予防のために作成された実験式。気温と湿度に加え、気流と放射も考慮している。ただし、 T_w は暴露した自然湿球温度。 $WBGT(屋外) = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T$ T : 乾球温度(°C)、 T_w : 自然湿球温度(°C)、 T_g : 黒球温度(°C) 持田ら(2007)により、熱平衡を基にした検討がなされており、観測地点と時間帯で特有な係数の設定が必要としながらも、全天日射量 600W/m ² 、代謝量 1~4met、着衣量 0.2~1.0clo、風速 1.0~5.0m/s の範囲では、 $WBGT(屋外) = 0.84T_w + 0.30T_g - 0.08T$ の方がより適切とされている。	○	
有効温度	有効温度 ET	現実環境と同じ温熱感覚を与える相対湿度 100%、無風時の気温として定義。気温と平均放射温度が等しく、相対湿度 100%、風速 0.1m/s 以下に制御された実験室の気温と等しく感じる場合の温度により表現。多くの被験者による主観的判断に基づいている。	×
	新有効温度 ET*	気温、湿度、気流、放射、着衣量、代謝を総合的に評価できる熱平衡式に基づいた指標。2ノードモデルにより発汗による体温調節機能を考慮。標準環境の相対湿度は 50%。	※
	標準新有効温度 SET*	相対湿度 50%に加え、標準環境として風速 0.135m/s、代謝量 M(met)、標準着衣量(下式)を与え、異なった条件の温熱環境の比較を可能にしている。 $I_{cl.s} = 1.33 / (M + 0.74) - 0.095$	※
	OUT_SET*	MRT の入力項に OUT_MRT を用いることで日射を加味した指標。	○
作用温度	作用温度 OT	気温と放射のみを考慮。 T と T_r の加重平均値。 $OT = (h_c T + h_r T_r) / (h_c + h_r)$ T : 乾球温度(°C)、 T_r : 平均放射温度(°C)、 h_c : 対流熱伝達率(W/°Cm ²)、 h_r : 放射熱伝達率(W/°Cm ²)	×
	湿り作用温度 HOT	作用温度に湿度の影響を評価できるようにした指標。現実の温熱環境におかれた人体からの熱損失量が皮膚からの蒸散による熱損失量と等しくなる相対湿度 100%の気温で表現されている。	×
	標準湿り作用温度 SHOT	標準風速(0.1m/s)を用いて湿り作用温度に気流の影響を組み込んでいる。標準着衣量(0.6clo)、標準相対湿度(100%)の環境を基準としている。	×
	修正湿り作用温度 HOTV	気流、放射、湿度の影響の温度換算値を、温熱風速場(TVF)、有効放射場(ERF)、減効湿度場(RHF)で表現できる。ただし、日射及び伝導の影響は含まれていない。 $HOTV = T + \frac{TVF}{K_{tv}} + \frac{ERF}{K_{tv}} - \frac{RHF}{K_{tv}}$ T : 乾球温度(°C)、 K_{tv} : 人体の湿り総合熱伝達率(W/°Cm ²)	×

指標名	概要	温熱4要素 屋外利用
修正新有効 温度 ETV	<p>相対湿度 100%を基準としている HOTV を相対湿度 50%基準に変換した指標。減効湿度場(RHF)に代わり、有効湿度場(EHF)を用いて定義される。ただし、日射及び伝導の影響は含まれていない。</p> $ETV = T + \frac{TVF}{h_v} + \frac{ERF}{h_v} + \frac{EHF}{h_v}$ $h_v = h_o F_{clo} + h_r F_{cl}$ <p>T: 乾球温度(°C)、h_o: 基準対流熱伝導率(W/°Cm²)、h_r: 放射熱伝達率(W/°Cm²)、F_{clo}: 基準着衣の伝導効率(ND)、F_{cl}: 着衣の伝導効率(ND)</p>	×
総合有効 温度 ETU	<p>日射と伝導の影響を組み込み、屋外熱環境にも不均一熱環境にも適用可能とした指標。</p> $ETU = t_{ao} + \frac{\sum NUATFi}{h_u} + \frac{\sum TVFi}{h_u} + \frac{\sum ERFLi}{h_u} + \frac{\sum TVFri}{h_u} + \frac{\sum ERFSi}{h_u} + \frac{\sum EHF_i}{h_u} + \frac{\sum TVFei}{h_u} + \frac{\sum SECFj}{h_u}$ $h_u = h_v f_n + h_{do} f_d$ $h_v = h_{co} F_{cleo} + h_r F_{cle}$ <p>t_{ao}: 代表気温(°C)、NUATFi: 代表気温と部位 i 周辺の気温との差の影響を表す不均一気温場(W/m²)、TVFi: 人体に対する風速の影響を表す温熱風速場(W/m²)、ERFLi: 人体に対する長波長放射の影響を表す長波長有効放射場(W/m²)、TVFri: 評価対象の環境条件と基準条件との差によって生じる長波放射による有効な温度変化を表す場(W/m²)、ERFSi: 人体に対する短波放射(日射)の影響を表す短波長有効放射場(W/m²)、EHFi: 人体に対する湿度の影響を表す有効湿度場(W/m²)、TVFei: 評価対象の環境条件と基準条件との差によって生じる蒸発による有効な水蒸気圧変化を表す場(W/m²)、SECFj: 代表部材に基づいて人体に対する接触面での伝導の影響を表す標準有効伝導場(W/m²)、h_{do}: 代表部材の熱コンダクタンス(W/Km²)、f_n: 全人体皮膚面積に対する非接触面積の比(ND)、f_d: 全人体皮膚面積に対する接触面積の比(ND)、h_{co}: 基準条件における対流熱伝達率(W/Km²)、h_r: 放射熱伝達率(W/Km²)、F_{cleo}: 基準条件における有効伝熱効率(ND)、F_{cle}: 着衣の有効伝熱効率(ND)</p>	○
熱ストレス指数 HSI	<p>人体の水分蒸発に着目。皮膚温を 35°C に仮定した人体の熱平衡式より求める。</p> $HSI (\%) = (E / E_{max}) \times 100$ <p>E: 人体が熱平衡を保つために必要な蒸発放熱量(W/m²)、E_{max}: 人体が完全に濡れた状態時の最大可能蒸発放熱量(W/m²)</p>	×
不快指数 THI	<p>気温と湿度を総合的に評価できる主観的経験的指標。THI が 70 で 10%、75 で 50%、80 で 100% が不快と感じる。</p> $THI = 0.72(T + T_w) + 40.6$ $THI = 0.81T + 0.01RH(0.99T - 14.3) + 46.3$ <p>T: 乾球温度(°C)、T_w: 湿球温度(°C)、RH: 相対湿度(%)</p>	×
予測平均 温冷感申告 PMV	<p>人体を均一 1 層と仮定した熱収支モデルと被験者実験による温冷感申告を組み合わせ作成される。温度を単位に用いない特有な温冷感スケールを採用 (-3 ~ +3 の 7 段階; 0 でも不満の人が約 5 % 存在する)。暑熱環境時の発汗を考慮できない。予測不満足率(PPD)も同時発表。椅座・安静の場合発汗しないことを前提とした快適方程式に基づいた指標であり、発汗するような暑い環境には向いていない。暖房環境向きと言われている。</p>	×
温冷感指数 TSI	<p>人体熱収支解析によらず、数値プログラムを用いる必要のない簡易な指標として提案。屋外における放射・風の影響を考慮している。</p> $TSI = a_1(\sqrt{U} + a_2)(T_b - T_o) + a_3$	×

指標名	概要	温熱4要素 屋外利用
	U：風速(m/s)、T ₀ ：作用温度(°C)、T _b ：基準温度(36.8°C)、a ₁ , a ₂ , a ₃ ：無次元定数(木内(2000) ¹ ではそれぞれ0.158, 0.19, 3.59を用いている。)	
PET	PMV から発展させた指標で、欧州で多く用いられている。人体の熱収支に基づき、気温、放射、風速、湿度の影響を統合して表す(人体モデルは2ノードモデルを使用)。ただし多量の発汗について想定しておらず、日本人の屋外での温熱生理の推定には適さない可能性がある。	※
ETFe	気温、風速、湿度、屋外での長波長放射、日射の他、姿勢の違いや接触している物質の表面温度も考慮された指標。各有効場を除く熱伝導率が風速の関数であり、風速と独立しているはずの日射による温度変化量が風速の影響を受ける。 $ETFe = T + \frac{TVF_{hta}}{h_{fl}} + \frac{ERF_{htaL}}{h_{fl}} + \frac{ECF_{hta}}{h_{fl}} + \frac{EHF_{ETFe}}{h_{fl}} + \frac{ERF_{htaS}}{h_{fl}}$ T：乾球温度(°C)、TVF _{hta} ：対流熱輸送に係る温熱風速場(W/m ²)、ERF _{htaL} ：屋外空間の長波長放射が考慮された長波長有効放射場(W/m ²)、ECF _{hta} ：人体に対する接触面での伝導の影響を表す有効伝導場(W/m ²)、EHF _{ETFe} ：湿度の影響を表す有効湿度場(W/m ²)、ERF _{htaS} ：日射量の影響を表す屋外空間における短波長有効放射場(W/m ²)、h _{fl} ：屋外における長波長放射を考慮した放射熱伝達率(W/m ² K)	○
UTCI	国際生気象学会により提唱されている指標。UTCI-Fiala MN モデルによる熱収支計算に基づき、気温、放射、風速、湿度の影響を統合して表す。標準状態は、2.3MET(4km/hの歩行)、風速0.5m/s(観測高度10m)、気温と同等の平均放射温度、相対湿度50%(気温29°Cより大きい場合は20hPa)としている。	※
平均放射温度	<p>体感指標の算出の際に放射のパラメータとして用いられる。周囲の全方向から受ける放射熱を平均化した周辺表面の平均温度表示を言う。</p> $t_r = \sum_i t_i \phi_i \quad t_i: \text{面 } i \text{ の表面温度}(^{\circ}\text{C}), \phi_i: \text{面 } i \text{ の形態係数(ND)}$	—
	<p>日射を考慮した平均放射温度のひとつ。</p> $t_{mrt}^* = \left[t_{mrt}^4 + f_p \cdot a_k \cdot \frac{I^*}{\epsilon_p \cdot \sigma} \right]^{0.25} - 273.2$ <p>t_{mrt}：直達日射を含まない平均放射温度、f_p：人体投影面積率(ND)、a_k：短波長放射に対する吸収率(ND)、I*：法線面直達日射量(W/m²)、ε_p：着衣人体の放射率(=0.97)(ND)、σ：ステファンボルツマン定数(=5.67×10⁻⁸ W/m²K⁴)</p> <p>上下2方向の長短波放射量からの算出方法は下記の通り。なお、I_{dH}は水平面拡散日射量(W/m²)で、直達日射を遮る遮蔽バンド等を全天日射計に取り付けて測定する方法が一般的に用いられる。</p> $t_{mrt}^* = \left[\frac{1}{\sigma} \left(f_{eff} \left(\frac{a_k \cdot I_{dH} + S \uparrow + L \downarrow + L \uparrow}{2} + \frac{a_k \cdot f_p}{\epsilon_p} \cdot I^* \right) \right)^{0.25} - 273.2 \right]$ <p>また、黒球温度の測定値より、MRTを算出することもできる。通常は、(2)を線形化した(1)式が多く用いられているが、より正確なMRTを算出するためには、ISO及びASHRAEに規定されている式(2)等の使用が推奨されている。なお、黒色グローブ球と一般的な着衣の色彩が異なるため、黒球温度から算出したMRTは過大となる。</p> $t_r = t_g + 2.37\sqrt{v}(t_g - t_a) \quad (1)$ $t_r = \left[(t_g + 273)^4 + 2.5 \times 10^8 \times v^{0.6} (t_g - t_a) \right]^{0.25} - 273 \quad (2)$	—

¹ 木内 豪：屋外空間における温冷感指標に関する研究，天気 48(9)，pp. 661-671，2001

指標名	概要	温熱4要素 屋外利用
OUT_MRT	<p>日射を考慮した平均放射温度のひとつ。</p> $OUT_MRT = \left[\sum F_i \varepsilon_i T_i^4 + \frac{f_p (1 - \alpha_{cl}) S \downarrow}{F_{EFF} \sigma} + \frac{(1 - \alpha_{cl}) (D \downarrow + (S \downarrow + D \downarrow) \alpha_{GND})}{\sigma} \right]^{0.25} - 273.2$ <p>F：形態係数(ND)、f_p：直接照射された人体の表面積要素 ($f_p = 0.42 \cos \beta + 0.043 \sin \beta$)、 σ：ステファンボルツマン定数($=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)、T：各部分の表面温度(K)、$D \downarrow$： 天空日射量 (=全天日射-直達日射 $\sin \beta$)、ε：各部分の放射率、α_{cl}：着衣状態の体表面 面反射率、α_{GND}：地表面反射率、β：太陽高度、$S \downarrow$：水平面直達日射量 (直達日射 \sin β)、F_{EFF}：実行放射エリアの要素 (=1.0：立位状態)</p>	—

※：MRTの入力項に日射を考慮した平均放射温度を用いることで日射を加味することが可能

【参考文献】

- 渡邊 慎一，堀越 哲美：測定に基づいた屋外における平均放射温度の算出方法，日本生気象学会雑誌，49(2)，49-59，2012
- Peter Bröde, Dusan Fiala, Krzysztof Błażejczyk, Ingvar Holmér, Gerd Jendritzky, Bernhard Kampmann, Birger Tinz, George Havenith : Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI), International Journal of Biometeorology, Volume 56, Issue 3, pp.481-494, 2012
- Yoshihito Kurazumi, Tadahiro Tsuchikawa, Naoki Matsubara, Emi Kondo, Tetsumi Horikoshi : Evaluation of enhanced conduction-corrected modified effective temperature ETFe as the outdoor thermal environment evaluation index, Energy and Buildings, Volume 43, Issue 10, pp.2926-2938, 2011
- 長野 和雄，堀越 哲美：屋外および不均一熱環境下に適用可能な総合体感指標の開発，日本建築学会環境系論文集，76(660)，131-139，2011
- 大橋 唯太：温熱指標(新用語解説)，天気，57(1)，57-59，2010
- 「<建築学テキスト>建築環境工学 環境のとらえ方とつくり方を学ぶ」，(株)学芸出版社，2009
- 持田 徹，桑原 浩平，佐古井 智紀：WBGT式の導出と温感工学的分析：屋外用WBGT式の特長，空気調和・衛生工学会論文集，(128)，1-9，2007
- 関谷 隼人，垂水 弘夫：都市街路空間における緑・水環境が歩行者に及ぼす温冷感緩和効果に関する研究：金沢街路空間での夏期実測評価，日本建築学会北陸支部研究報告集，(50)，157-160，2007
- 「新版・快適な温熱環境のメカニズム 豊かな生活空間をめざして」，丸善(株)，2006
- 木内 豪：屋外空間における温冷感指標に関する研究，天気，48(9)，661-671，2001
- 堀越 哲美，土川 忠浩，蔵澄 美仁，松原 斎樹，宮本 征一：修正作用湿度の相対湿度50%への変換表現，日本建築学会学術講演梗概集，409-410，1995
- H. Mayer, P. Höppe : Thermal comfort of man in different urban environments, Theoretical and Applied Climatology, Volume 38, Issue 1, pp.43-49, 1987
- 堀越 哲美，小林 陽太郎：総合的な温熱環境指標としての修正湿度作用温度の研究，日本建築学会計画系論文報告集，(355)，12-19，1985